总论
Overall View

“亚洲水塔”变化与影响

姚檀栋[1,2,3] 邬光剑[1,2] 徐柏青[1,2] 王伟财[1,2] 高 晶[1,2] 安宝晟[1,2]
1 中国科学院青藏高原研究所 北京 100101
2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
3 兰州大学 兰州 730000

摘要 以青藏高原为核心的“第三极”是除南极和北极以外冰雪储量最大的地区，被称为“亚洲水塔”，包括面积约 1×10^5 km^2 的冰川、总面积约 5×10^4 km^2 的湖泊和长江、黄河、雅鲁藏布江、印度河、恒河、湄公河、阿姆河、塔里木河等10多条亚洲大江大河的源头。“亚洲水塔”变化关系着中国的水资源利用以及“一带一路”地区众多国家的水安全。在气候变暖背景下，“亚洲水塔”正在发生以失衡为特征的剧烈变化。冰川加速退缩、湖泊整体显著扩张、冰川径流增加等过程都和“亚洲水塔”失衡密切相关。“亚洲水塔”的失衡变化导致了青藏高原及周边地区水资源和水灾害风险增加，出现了冰崩等新型灾害。这些变化也可以通过大气圈和水圈产生广域效应，进而和南极、北极变化协同联动，影响全球气候变化和水循环。第二次青藏高原综合科学考察研究聚焦于过去50年来“亚洲水塔”动态变化及其影响，与“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”专项实施一道，为我国资源环境重大战略需求和绿色“一带一路”发展，提出应对“亚洲水塔”变化与影响的科学对策和水资源规划管理及可持续发展的科学指导，以服务于全球生态环境保护、人类命运共同体建设。

关键词 亚洲水塔，失衡变化，灾害效应，广域影响

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.003

1 “亚洲水塔”概况

青藏高原及周边地区，平均海拔超过4 000 m，具有南极、北极之外最大的冰储量[1]，其湖泊面积约占我国湖泊总面积的一半，是长江、黄河、雅鲁藏布江等亚洲10多条主要河流发源地，因此，有“亚洲水塔”之称[2]（图1）。“亚洲水塔”储存了大量的淡水资源，对“第三极”地区人类的生存和社会稳定及发展都有重要影响[3]。

冰川、冻土、积雪、湖泊、河流等是“亚洲水塔”的重要组成部分，其中冰川面积约 1×10^5 km^2，多年冻土面积约 1.3×10^6 km^2，常年积雪面积约

资助项目：第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0208），中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA20100300）
修改稿收到日期：2019年10月11日

3×10^5 km^2，湖泊面积约 5×10^4 km^2 ①。“亚洲水塔”也是亚洲 10 多条大江大河的源头。不同组分间保持动态平衡，以维持“亚洲水塔”水循环。

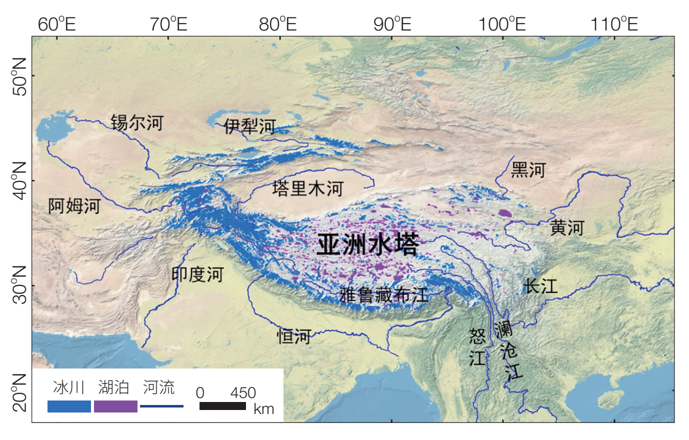


图 1　“亚洲水塔”的特征

2 近 50 年“亚洲水塔”的变化

过去 50 年来，人类经历了前所未有的全球变暖。以青藏高原为核心的“第三极”地区更是全球变暖最强烈的地区。在全球每 10 年升温 0.17℃ 的背景下，这一地区每 10 年升温幅度高达 0.3℃—0.4℃，其升温幅度是同期全球其他地区平均值的 2 倍[4]。在快速升温的背景下，“亚洲水塔”正在发生剧烈变化[5]，呈现整体失衡特征，主要表现为冰川加速退缩、湖泊显著扩张、冰川径流增加，水循环加强。

2.1 冰川退缩导致“亚洲水塔”的固态水储量减少

近 50 年来，“亚洲水塔”的冰川整体上处于亏损状态，冰川储量减少约 20%，面积减少约 18%[6]。冰川变化存在空间和时间差异。

在空间上，喜马拉雅山及藏东南地区冰川末端和面积后退幅度最大，向高原内部逐渐降低，西昆仑、喀喇昆仑及帕米尔地区有一定数量的冰川处于稳定或前进；冰川物质平衡出现同样的空间变化差异，物质亏损幅度呈现从喜马拉雅山向高原腹地减小的格局[7]。第二次青藏高原综合科学考察研究发现，自 1976 年以来，藏东南冰川退缩幅度平均达每年 40 m，有的冰川退缩甚至超过每年 60 m；唐古拉中东段、念青唐古拉西段、喜马拉雅冰川末端退缩速率相当，平均约为每年 20—30 m；向西至各拉丹冬地区约为每年 17 m，普若岗日冰原则减小为每年 4 m 左右；至喀喇昆仑、西昆仑冰川末端变化不明显。面积变化上，藏东南减小幅度最大，超过 25%，个别小型冰川甚至达 50% 以上；唐古拉中东段、念青唐古拉西段、喜马拉雅冰川总体减少 20% 左右；向西至各拉丹冬地区约为 8.8%，普若岗日冰原则减小约为 5.0%；至喀喇昆仑、西昆仑仅为 1.4%—4.0%①。

在时间上，20 世纪 90 年代冰川状态发生了变化，出现重要的转折。在此之前冰川长度、面积及物质平衡持续减小；在此之后，“第三极”西北部西风带冰川出现稳定甚至前进，物质平衡由负转正，出现了“喀喇昆仑异常”，而东部和南部季风区冰川退缩幅度进一步加大[8]。

2.2 湖泊扩张是“亚洲水塔”液态水储量增加的标志

“亚洲水塔”湖泊数量众多，面积大于 1 km^2 的湖泊有 1 000 多个。这些湖泊主要为内流湖，约占湖泊总面积的 90%，多分布在海拔 4 000—5 000 m 的范围。第二次青藏高原综合科学考察研究发现，“亚洲水塔”湖泊数量明显增多，80% 以上的湖泊在扩张。面积大于 1 km^2 的湖泊数量和总面积从 20 世纪 70 年代的 1 081 个和 4×10^4 km^2 扩张到 2010 年的 1 236 个和 4.74×10^4 km^2[9]。青藏高原中部江湖源的色林错、纳木错、巴木错、蓬错、达如错和兹格塘错等 6 个湖泊，1976—2010 年面积扩张了 20.2%，尤其 1999 年以后表现出显著的加速扩张；其中，受冰川融水补给的色林错、纳木错和蓬错湖泊水位在 1999—2010 年

① 数据源自第二次青藏高原综合科学考察研究队尚未发表的科考报告。

分别上涨约 1.0 m、0.7 m 和1.1 m，较非冰川补给湖泊上涨更明显。色林错 1972—2017 年面积增加了 710.5 km^2，水储量增加 24.9 Gt，在2010 年面积超过纳木错成为西藏最大的湖泊，2017 年色林错面积达到了 2 396 km^2。

在空间分布上，内流区湖泊水位明显升高，而在雅鲁藏布江流域，湖泊水位以下降为主。目前，青藏高原湖泊水量每年增加约 8 Gt，其中冰川、冻土融化的贡献达 26% 左右[10]。在有些地区，冰川消融是湖泊扩张和水量增加的主导因素。例如，纳木错水量变化的定量分析表明，冰川融水对湖泊补给增量的贡献率为 52.9%。

2.3 河流径流显著增大

“亚洲水塔”的河流径流量变化对下游的水资源和水环境产生显著影响。以雅鲁藏布江、印度河和叶尔羌河上游流域为例，冰川融水是叶尔羌河和印度河上游以及雅鲁藏布江流域的重要水资源。在我国西北内陆干旱区，冰川融水占出山径流的 25%—29%，而在塔里木河则占 40% 左右。冰川融水对黄河、澜沧江、长江、怒江、雅鲁藏布江和印度河源区年径流的贡献分别为 0.5%、2.8%、7.8%、8.3%、15% 和 45.6%。

第二次青藏高原综合科学考察研究发现，20 世纪 70 年代以来河流径流量呈现不同程度地增加。根据长江源沱沱河流域冰川径流的估算结果，沱沱河流域年平均冰川融水量为 3.8×10^7 m^3，在 2010 年，冰川融水径流达到最大值，比 1960—2000 年的融水径流平均值增加了 120.89%。沱沱河流域冰川融水径流呈增加的趋势，这与流域河道的年径流和湿季径流变化趋势基本一致；冰川融水对河道湿季径流的补给率也呈增加趋势，平均补给率为 12.21%，最大补给率为 27.12%。1970—2013 年，雅鲁藏布江、印度河上游年径流量呈增加趋势，冰川融水对径流的补给是径流量增长的主要因素[11]。

3 “亚洲水塔”变化的影响

“亚洲水塔”近 50 年来不断向失衡方向发展，主要特征是固态水储量减小。随着冰川的持续亏损，冰川储量逐步减少，冰川融水径流最终将减少甚至消失，未来可用水资源减少[12]，水资源短缺潜在风险加剧。在未来气候变化情景下，2046—2065 年的日平均流量与2000—2007 年日平均流量对比，印度河上游径流将减少 8.4%，恒河上游径流将减少 17.6%，雅鲁藏布江径流将减少 19.6%，长江上游河流径流将减少 5.2%[2]。

“亚洲水塔”变化导致冰崩和冰湖溃决等灾害发生频率增加。2016 年 7 月17日和 9月21日，西藏阿里地区的阿汝 53 号冰川和 50 号冰川发生冰崩，造成 9 名当地居民死亡、数百头牲畜被埋和优质草场毁坏[13]。2018 年 10月16日，雅鲁藏布江中下游米林县派镇加拉村下游 7 km 处色东普沟发生冰崩，冰崩及其携带的冰碛物导致雅鲁藏布江断流、水位上涨，形成冰崩堰塞湖；10 月 29 日，该地再次发生冰崩堵江事件。冰崩堰塞湖对上、下游派镇、墨脱县沿岸居民及交通线路构成巨大破坏，且存在继续发生堵江风险。这是青藏高原从未有过的自然灾害现象，严重威胁“亚洲水塔”的命运。1981 年 7月10日，西藏聂拉木县樟藏布次仁玛错冰湖溃决，洪水造成波曲河 50 多公里沿河两岸松散物质大量坍塌和滑坡，诱发冰湖溃决泥石流，导致樟藏布沟口的原 707 号大桥、波曲河友谊桥及附近建筑物全部被毁；还使得尼泊尔境内的逊科西水电站部分被毁，尼泊尔境内人员死亡达 200 多人[14]。2013 年 7 月 5 日，西藏嘉黎县然则日阿错冰湖溃决，造成了人员失踪和房屋、桥梁、道路被毁，直接经济损失按当时价值计算高达 2.7 亿元[15]。研究表明，喜马拉雅地区面积大于 0.0081 km^2 的冰湖数量，从 1990 年的 4 549 个增加到2015 年的 4 950 个，冰湖面积增大了约 14%[16]。在我国境内的青藏高原，有 210 个冰

湖威胁到人类定居点，其中具有极高危险性的冰湖有30个，集中分布在喜马拉雅山中段的吉隆县、聂拉木县和定日县[17]。未来几十年，青藏高原冰湖溃决风险将增加。

"亚洲水塔"变化可以通过大气圈和水圈产生广域效应，进而和南极、北极变化协同联动，影响全球气候变化和水循环。① 在全球变暖过程中，"亚洲水塔"通过改变海陆热力差异影响区域大气环流，重新调制亚洲季风和西风的协同作用机制，从而改变东亚和南亚降水时空分布。② "亚洲水塔"变化通过水圈作用过程产生的广域效应和南极、北极一样，会加速冰川消融和外流河流径流增加，对全球海平面变化产生影响，进而通过对海平面的调整对我国沿海地区产生严重影响。因此，"亚洲水塔"与南极、北两极之间在某种程度上存在着的联动变化，会共同影响全球变化。

4 第二次青藏科考和"丝路环境"专项在"亚洲水塔"变化与影响研究方面取得阶段性进展

"亚洲水塔"冰川、积雪、冻土、湖泊和河流等关键过程的变化是水体多相态转换与作用的过程，是一个多圈层相互作用的地球系统科学前沿问题。"亚洲水塔"变化的灾害风险不但给我国社会经济发展带来严峻挑战，也对"一带一路"地区众多国家水资源规划管理和可持续发展带来环境风险，事关人类命运共同体建设。这些挑战和风险的应对，需要多学科综合科学考察研究来解决。

为了研究"亚洲水塔"的变化与影响，并提出科学应对方案，中国科学院率先部署了"泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设"战略性先导科技专项（A类）（以下简称"丝路环境专项"）[18]。通过"第三极环境（TPE）"国际计划，丝路环境专项联合了国内外相关领域的知名科学家，通过综合集成观测和模拟，对"亚洲水塔"的变化和影响进行过程和机制研究，并以此为基础，提出应对方案，服务于"亚洲水塔"和"一带一路"地区的水安全战略和水资源管理。世界气象组织（WMO）、联合国教科文组织（UNESCO）、联合国环境署（UNEP）等国际组织已将第二次青藏高原综合科学考察研究队提出的"亚洲水塔"观测-模拟集成研究计划纳入其行动计划。

在丝路环境专项的支持下，第二次青藏高原综合科学考察研究队将传统的地学观测与高新技术结合，目前已经在"亚洲水塔"动态变化方面取得了国际青藏高原地球系统科学研究最新引领性成果，研究成果发表在 *Nature*、*Science*、*Bulletin of American Meteorological Society* 和 *Nature Geoscience* 等期刊上。研究成果系统分析了印度季风与西风影响下的"亚洲水塔"动态变化现状，分析了新型冰崩灾害的成因，从地球系统科学理念提出了系统的"亚洲水塔"变化三维观测方案等[19]。部分成果入选2018年"中国科学院面向世界科技前沿14项标志性重大成果"。特别是，通过高新技术与前沿科学问题的融合，2019年5月，第二次青藏高原综合科学考察研究队利用浮空艇平台实现了7 003 m高空水汽传输垂直变化过程观测，创下浮空器原位垂直科学观测的世界纪录[20]。2019年1月25日和5月23日，中央电视台《新闻联播》节目两次对此项科考工作进行专题报道，在社会各界产生了广泛影响。

"亚洲水塔"科考成果融合于国家和区域水资源水安全战略。第二次青藏高原综合科学考察研究队承担了中共中央政治局常委、国务院总理李克强关于中国冰川变化批示的重大任务，于2019年5月完成《关于我国冰川变化影响及对策的报告》《加强中国冰川变化监测的总体方案》等报告。在2018年8月28日，在中共中央政治局常委、全国政协主席汪洋主持召开的中央推动区域协调发展战略调研汇报会上，"亚洲水塔"科考成果为"加强青藏高原生态文明建设积极

应对气候变化”建议提供科技支撑。针对雅鲁藏布江的堵江灾害，第二次青藏高原综合科学考察研究队队长姚檀栋第一时间赶往现场，和西藏自治区主席齐扎拉一起现场勘查；确定堵江成因为冰崩，并协调多方研究力量，快速完成《雅鲁藏布江大拐弯冰崩堵江事件科学评估报告》，为西藏自治区的后期减灾行动提出了可实施的科学方案。中国科学院院长白春礼对该报告作出重要批示。在此基础上，第二次青藏高原综合科学考察研究队正在加快建设雅鲁藏布江冰崩堵江灾害监测预警体系。

今后，第二次青藏高原综合科学考察研究队将以阐明“亚洲水塔”各关键过程的变化特征、揭示近 50 年来“亚洲水塔”变化的过程与机理和预估未来不同气候变化情景下“亚洲水塔”的变化趋势为基础，开展“亚洲水塔”变化对青藏高原及周边地区水循环与水生态的影响研究，进行“亚洲水塔”水-生态系统-人类社会系统的链式响应评估，拓展三极（“第三极”、南极、北极）气候与环境变化及其影响的全球尺度联动研究和全球生态环境保护研究，同时要体现第二次青藏高原综合科学考察研究水平“用得上、有影响、留得下”的定位，建设自动化监测预警平台和示范，提升区域防灾减灾能力。

参考文献

1 Yao T D, Thompson L, Mosbrugger V, et al. Third Pole Environment (TPE). Environmental Development, 2012, 3: 52-64.

2 Immerzeel W W, Beek L P H V, Bierkens M F P, et al. Climate change will affect the Asian Water Towers. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.

3 Pritchard H D. Asia’s shrinking glaciers protect large populations from drought stress. Nature, 2019, 569: 649-654.

4 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估：过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60: 3025-3035.

5 Yao T D, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole’s rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.

6 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70: 3-16.

7 Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

8 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险. 科学通报, 2019, 64: 2770-2782.

9 Zhang G Q, Yao T D, Xie H, et al. Lakes’ state and abundance across the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(24): 3010-3021.

10 Zhang G Q, Yao T D, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau’s endorheic basin. Geophysical Research Letters, 2017, 44: 5550-5560.

11 Su F G, Zhang L, Ou T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau. Global and Planetary Change, 2016, 136: 82-95.

12 Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. Nature Climate Change, 2018, 8: 135-140.

13 Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. Nature Geoscience, 2018, 11(2): 114-120.

14 Wang W C, Gao Y, Iribarren P, et al. Integrated hazard assessment of Cirenmaco glacial lake in Zhangzangbo valley, Central Himalayas. Geomorphology, 2018, 306: 292-305.

15 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害. 冰川冻土, 2014, 36(1): 158-165.

16 Nie Y, Sheng Y W, Liu Q, et al. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. Remote Sensing of Environment, 2017, 189: 1-13.

17 Simon K A, Zhang G Q, Wang W C, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach. Science Bulletin, 2019, 64(7): 435-445.

18 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924-931.

19 Gao J, Yao T D, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565: 19-21.

20 新华网. 第二次青藏科考首次获得青藏高原海拔7000米高空大气组分科学观测数据. [2019-05-30]. http://m.xinhuanet.com/2019-05/30/c_1124562023.htm.

Asian Water Tower Change and Its Impacts

YAO Tandong[1,2,3] WU Guangjian[1,2] XU Baiqing[1,2] WANG Weicai[1,2] GAO Jing[1,2] AN Baosheng[1,2]

（1 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China;

3 Lanzhou University, Lanzhou 730000, China）

Abstract The Tibetan Plateau and surroundings, also known as the Third Pole, is widely acknowledged as the Asian Water Tower. It holds glaciers with an area about 100 000 km^2, and lakes with an area about 50 000 km^2. It gives birth to more than ten big rivers in Asia including the Yangtze River, Yellow River, Yarlung Tsangpo, Indus, Ganges, Mekong, Amu Darya, Tarim River, etc. Its environmental changes affect water resources utilization in China and water securities in many nations involved in the Belt and Road initiative. The Asian Water Tower is undergoing dramatic changes characterized with unbalance in a warming climate. Accelerated glacier retreats, permafrost degradation, lake expansion, as well as increase of glacial melt to runoff are all related to the unbalance change of the Asian Water Tower. These have put the Tibetan Plateau and its surrounding regions at risk and caused many water-related hazards such as glacier collapse. Asian Water Tower change would even be amplified through the atmosphere and hydrosphere to affect global climate and water cycle, thus coupling and interacting with changes on the Arctic and Antarctica. The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research program (STEP) and Pan-Third Pole Environment study for a Green Silk Road program (Pan-TPE) will focus on the study of Asian Water Tower change and its local to regional impacts in the past half century, conduct comprehensive field expeditions and research, and advise on science policy to confront Asian Water Tower change and impacts. The ultimate goal of the STEP and Pan-TPE is to provide scientific advice to China and nations around on water resources regulations and sustainable development, thus serving global ecological environment and a community with a shared future for mankind.

Keywords Asian Water Tower, unbalanced change, hazards effects, far-reaching effect



姚檀栋　中国科学院院士，第二次青藏高原综合科学考察研究队队长、中国科学院战略性先导科技专项（A类）“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”首席科学家。中国青藏高原研究会理事长、“第三极环境（TPE）”国际计划主席。长期从事青藏高原科学考察研究，在冰川与环境变化研究领域作出了系统性创新贡献。研究发现气候变暖和西风与季风协同作用是青藏高原冰川变化区域差异的主要驱动力；组织撰写的《西藏高原环境变化科学评估》报告为推进青藏高原生态屏障建设提供了重要科学依据；发起的TPE国际计划促进了国际青藏高原研究领域的深度交流。发表论文300多篇，其中重要成果发表在包括*Nature*、*Science*、*Nature Climate Change*、*Review of Geophysics*、*BAMS*等国际权威期刊上。2017年因在青藏高原冰川和环境研究方面所作出的贡献荣获维加奖。E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

YAO Tandong　Member of Chinese Academy of Sciences (CAS). He is also the Chair of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research program (STEP) and Pan-Third Pole Environment study for a Green Silk Road program (Pan-TPE), Chairman of the China Society on Tibetan Plateau (CSTP), Co-chair of Third Pole Environment (TPE) Program. Yao Tandong has been focusing and internationally acknowledged of his study on glacier and environment on the Tibetan Plateau. He has carried out different programs relating to environment in the past 30 years. His research has been published in *Nature*, *Science*, *Nature Climate Change*, *Review of Geophysics*, *BAMS*, etc. One of his recent works reveals that, under the impact of global warming, glaciers in the Tibetan Plateau and surrounding regions are retreating rapidly and spatially different because of the interaction between the Indian monsoon and westerlies, with the most rapid retreating in the southeast Tibetan Plateau and the least retreating in the northwest Tibetan Plateau. He has successfully organized many international conferences and workshops, as well as several major national and international research programs. Among them, the TPE program has been internationally influential. He has been awarded the Vega Medal for his pioneering work on the Tibetan Plateau glacier and environment in 2017. E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

■责任编辑：张帆

参考文献（双语版）

1 Yao T D, Thompson L G, Mosbrugger V, et al. Third Pole Environment (TPE). Environmental Development, 2012, 3: 52-64.

2 Immerzeel W W, Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian Water Towers. Science, 2010, 328(5984): 1382-1385.

3 Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. Nature, 2019, 569(7758): 649-654.

4 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估：过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60(32): 3025-3035.

Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3025-3035. (in Chinese)

5 Yao T D, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: multi-disciplinary approach with observation, modeling and analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.

6 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70: 3-16.

Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the second Chinese glacier inventory. Acta Geographica Sinica, 2015, 70: 3-16. (in Chinese)

7 Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

8 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险. 科学通报, 2019, 64(27): 2770-2782.

Yao T D, Yu W S, Wu G J, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2770-2782. (in Chinese)

9 Zhang G Q, Yao T D, Xie H, et al. Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(24): 3010-3021.

10 Zhang G Q, Yao T D, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. Geophysical Research Letters, 2017, 44: 5550-5560.

11 Su F G, Zhang L, Ou T, et al. Hydrological response to future climate changes for the major upstream river basins in the Tibetan Plateau. Global and Planetary Change, 2016, 136: 82-95.

12 Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. Nature Climate Change, 2018, 8(2): 135-140.

13 Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. Nature Geoscience, 2018, 11(2): 114-120.

14 Wang W C, Gao Y, Iribarren P, et al. Integrated hazard assessment of Cirenmaco glacial lake in Zhangzangbo valley, Central Himalayas. Geomorphology, 2018, 306: 292-305.

15 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013年西藏嘉黎县"7.5"冰湖溃决洪水成因及潜在危害. 冰川冻土, 2014, 36(1): 158-165.

Sun M P, Liu S Y, Yao X J, et al. The cause and potential hazard of glacial lake outburst flood occurred on July 5, 2013 in Jiali County, Tibet. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 158-165. (in Chinese)

16 Nie Y, Sheng Y W, Liu Q, et al. A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. Remote Sensing of Environment, 2017, 189: 1-13.

17 Simon K A, Zhang G Q, Wang W C, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach. Science Bulletin, 2019, 64(7): 435-445.

18 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924-931.

Yao T D, Chen F H, Cui P, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 924-931. (in Chinese)

19 Gao J, Yao T D, Masson-Delmotte V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies. Nature, 2019, 565(7737): 19-21.

20 新华网. 第二次青藏科考首次获得青藏高原海拔7000米高空大气组分科学观测数据. [2019-05-30]. http://m.xinhuanet.com/2019-05/30/c_1124562023.htm.

Xinhuanet. The second Qinghai-Tibet scientific expedition obtained scientific observation data of atmospheric components at an altitude of 7,000 meters above the Qinghai-Tibet Plateau for the first time. [2019-05-30]. http://m.xinhuanet.com/2019-05/30/c_1124562023.htm. (in Chinese)